بهینه‌سازی همزمان پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار در عملیات تراشکاری فولاد AISI1045*

فرهاد کلاهان[۱]   محسن منوچهری[۲]   عباس حسینی[۳]

چکیده *فرآیند ماشین‌کاری یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تولید قطعات فلزی است. از مهمترین مشخصه‌های قطعات تولیدی با این روش، کیفیت سطح قطعه می‌باشد. صافی سطح قطعات به‌نوبه‌ی خود تحت تأثیر پارامترهای تنظیمی فرآیند و هندسه‌ی ابزار قرار دارد. هدف اصلی در این تحقیق، بهینه سازی همزمان پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی) و زوایای ابزار (زاویه براده، زاویه تنظیم اصلی، زاویه تنظیم فرعی) در فرآیند تراشکاری فولاد AISI1045 می‌باشد. بهینه‌سازی همزمان پارامترهای برشی و زوایای ابزار، با استفاده از تحلیل‌های آماری بر روی داده‌های تجربی، انجام شده است. به منظور گردآوری داده‌های تجربی، از طرح تاگوچی در رویکرد طراحی آزمایش‌ها، استفاده شده است. سپس به کمک نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) و تحلیل نسبت سیگنال به نویز(S/N)، سطوح بهینه پارامترها به منظور بیشینه کردن کیفیت سطح تعیین شده‌اند. نتایج بهینه‌سازی از انطباق مناسبی بر آزمایش‌ها تجربی برخوردارند.*

واژه‌های کلیدی پارامترهای ماشین‌کاری، زوایای ابزار برش، طرح تاگوچی، بهینه‌سازی، تحلیل واریانس

Simultaneous Optimization of Machining Parameters and Tool Geometry Specifications in Turning Operation of AISI1045 Steel

F. Kolahan   M. Manoochehri   A. Hosseini

Abstract *Machining operation is one of the most applicable processes for the manufacturing of industrial parts. Usually, the quality of finished part in turning operation is measured in terms of surface roughness. In turn, surface quality is determined by machining parameters and tool geometry specifications. The main objective of this study is to model and optimize machining parameters and tool geometry in order to improve the surface roughness in turning operation of AISI1045 steel. Simultaneous optimization of machining parameters and tool geometry was performed using experimental data and statistical methods. A Taguchi approach is employed in order to gather experimental data and then, based on signal-to-noise (S/N) ratio, the best sets of cutting parameters and tool geometry specifications have been determined. Experimental results are provided to illustrate the effectiveness of the proposed approach.*

Key Words Machining parameters, Tool geometry, Taguchi method, Optimization procedure, Analysis of variance

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۵/۲، اولین پذیرش آن در تاریخ ۹۱/۳/۲ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۱/۵/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

امروزه، تولیدکنندگان به‌دنبال بهبود کیفیت محصولات و کاهش قیمت تمام شده‌ی آنها می‌باشند. ماشین‌کاری و برش فلزات یکی از مهمترین فرآیندهای تولید قطعات فلزی است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. کیفیت قطعه‌کار و هزینه‌های تولیدی در ماشین‌کاری مستقیماً تحت تأثیر هندسه‌ی ابزار و پارامترهای برشی قرار دارد. و در این رابطه، مطالعات انجام شده درماشین‌کاری عمدتاً بر روی جنس، هندسه‌ی ابزار و تنظیمات پارامترهای ماشین‌کاری متمرکز بوده است [1]. از طرفی یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی کیفیت قطعات ماشین‌کاری شده، صافی سطح نهایی قطعات است. صافی سطح به عوامل متعددی وابسته است که از مهمترین آنها می‌توان به هندسه‌ی ابزار برش و پارامترهای برشی (عمق برش، سرعت برش، نرخ پیشروی) اشاره نمود [2]. بنابراین به منظور دستیابی به صافی سطح مطلوب می‌بایست سطوح بهینه‌ی پارامترهای برشی و زوایای ابزار، با توجه به جنس قطعه کار، به‌نحو مطلوبی تعیین شوند. در اغلب کاربردهای عملی، انتخاب ابزار و تعیین مقادیر پارامترهای برشی به‌صورت تجربی و با استفاده از روش‌های مبتنی بر سعی و خطا انجام می‌گیرد. اما این روش‌ها، علاوه بر هزینه بالا، با احتمال خطا همراه هستند. در سال‌های اخیر، به‌کارگیری رویکردهای علمی و ریاضی در زمینه‌ی مدل‌سازی و بهینه‌سازی انواع فرآیندهای تولیدی، افزایش چشمگیری یافته است.

در این سال‌ها، به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری، مطالعات زیادی انجام شده است. این تحقیقات بیشتر از تکنیک‌های آماری، شبکه‌های عصبی مصنوعی و تئوری مجموعه‌های فازی در مدل‌سازی فرآیند تحت مطالعه بهره می‌گیرند [6-3]. همچنین به منظور تعیین سطوح بهینه‌ی پارامترهای تنظیمی، رویکردهای بهینه‌سازی متنوعی مانند روش تاگوچی، سطح پاسخ (Response Surface Methodology (RSM)) و الگوریتم‌های فرا ابتکاری (Metaheuristic Algorithm) استفاده شده است. یانگ و ترانگ [3] از روش تاگوچی و آنالیز واریانس (Analysis of Variance (ANOVA)) برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تراشکاری فولاد S45C استفاده نموده‌اند. کُپک و همکاران [4] مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، عمق برشی، جنس ابزار و جنس قطعه کار) برای دستیابی به صافی سطح دلخواه در عملیات تراشکاری قطعات فولادی کار سرد شده را به کمک روش تاگوچی به دست آورده‌اند. چِین و تِسای [5] با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی یک مدل برای پیش‌بینی فرسایش ابزار ارایه داده‌اند. با ترکیب این مدل و الگوریتم ژنتیک (GA) مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری برای فولاد ضد زنگ 17-4PH را به دست آورده‌اند.

از دیگر مباحث مهم در تحقیقات مرتبط با ماشین‌کاری، هندسه‌ی ابزار است. به‌عنوان مثال، نالبانت و همکاران [6] با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس میزان تأثیر و مقادیر بهینه‌ی شعاع نوک ابزار، نرخ پیشروی و عمق برش را برای دستیابی به صافی سطح مطلوب در تراشکاری فولاد AISI 1030 تعیین کرده‌اند. بر اساس نتایج ارایه شده توسط این محققین، شعاع نوک ابزار و نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی صافی سطح از خود نشان داده‌اند. این در حالی است که عمق برش (با تأثیر کمتر از ٤٪) در تعیین صافی سطح، تقریباً بی‌اثر است. اسلان و همکاران [7]، تأثیر پارامترهای برش بر سایش ابزار و صافی سطح در عملیات تراش فولاد سخت کاری شده را بررسی کرده و رابطه‌ی بین آنها را به صورت یک مدل ریاضی ارایه نموده‌اند. مانا و سالُدکار [8] شرایط بهینه‌ی برش برای دستیابی به صافی سطح مطلوب و حداقل هزینه‌ی ماشین‌کاری را در عملیات تراشکاری فولاد آلیاژی EO300 تعیین کرده‌اند. به منظور دستیابی به کیفیت سطح مطلوب برای کامپوزیت آلومینیوم

(Al/sic-MMC)، دیویم و همکاران [9] به کمک آنـالیز واریانس و شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مقادیر بهینـه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری را به دست آورده‌انـد. کینـی و چینچالکار [10] تأثیر پارامترهای ماشین‌کـاری بـر روی صافی سطح و نرخ برداشت ماده را در تراشکاری پلیمر تقویت شده با فایبر گلاس بررسی کرده و یک رابطه‌ی تجربی برای تعیین نرخ برداشت مـاده و صـافی سـطح ارایه نموده‌اند.

بـا توجـه بـه تاریخچـه‌ی تحقیـق، مهمتـرین مشخصه‌های هندسه‌ی ابزار در تراشکاری، شعاع نـوک ابزار، زاویه‌ی آزاد، زاویه‌ی براده و زوایای تنظیم اصلی و فرعی می‌باشند. در اغلب تحقیقات موجود، تأثیر هـر یک از پارامترهای هندسه‌ی ابزار بر روی کیفیت سطح به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که به طور کلی افزایش زاویه‌ی براده باعث بهبود کیفیت سطح می‌گـردد؛ در حـالی‌کـه تغییر زاویه‌ی آزاد، اثر قابل توجهی بر کیفیـت سـطح و نرخ برداشت ماده ندارد و تنها شرایط ماشـین‌کـاری را تسهیل می‌نماید [۱۱]. کولـو و همکـاران [12]، فرآینـد تراشکاری پر سرعت آلیاژ نیکل Inconel718 را مورد مطالعه قرار داده‌اند. ایشان تـأثیرات ناشـی از تغییـرات هندسی لبه‌ی برش (زاویه‌ی برش، عرض برش، شـعاع نوک ابزار و شکل لبه‌ی ابزار (تیز یا گـرد)) را بـر روی صـافی سـطح قطعـه و درجـه حـرارت منطقـه‌ی ماشین‌کاری بررسی کرده و مقادیر مناسب آنها را تعیین نموده‌اند. برای ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم، فنـگ و وو [13] تأثیرات هندسه‌ی لبه‌ی ابزار را بـر نیـروهـای برش، توان ماشین‌کاری و ضخامت براده مورد بررسـی قرار داده‌اند. آلتان و همکاران [14] تأثیر هندسه‌ی لبه‌ی ابزار، زاویه‌ی براده و شعاع نوک ابزار و شـرایط بـرش (سرعت برش) را بر روش تشـکیل بـراده در عملیـات تـراش سـخت بـه‌صـورت تجربـی (آزمایشـگاهی) و شبیه‌سازی شده در فولاد 100CR6 مورد مطالعـه قـرار داده‌اند.

علـی‌رغـم مطالعـات انجـام شـده در زمینـه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای ماشـین‌کـاری و انتخـاب ابـزار، تأثیر همزمان این دو گروه از عوامل بر کیفیـت فرآینـد ماشین‌کاری (صافی سطح)، به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، هدف از این مطالعه، مدل‌سازی و بهینه‌سازی همزمان پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار به عنـوان متغیرهـای مـوثر بـر کیفیـت سـطح در عملیات تراشکاری فولاد AISI 1045 می‌باشـد. بـدین منظور، برای جمع‌آوری داده‌های تجربی مـورد نیـاز، از رویکرد طراحی آزمایش‌ها بـه روش تـاگوچی اسـتفاده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری نتایج، سطوح بهینه‌ی پارامترها به کمک تکنیک‌های آمـاری و روش سیگنال به نویز (S/N) تعیین گردیده‌اند.

مواد و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها

ماده‌ی مورد مطالعه در این تحقیـق فـولاد AISI1045 است کـه کـاربرد فراوانـی در صـنایع ماشـین‌سـازی و قطعه‌سازی دارد. ترکیب شیمیایی این آلیـاژ در جـدول (۱) ارایه شده است. تمـامی آزمـایش‌هـای تجربـی بـر روی یک دستگاه تراش ۲ متری با توان اسپیندل ۲KW انجام شد. در این مطالعه، از ابزار برشی HSS تقویـت شده با ۵٪ کبالت، استفاده شده است. دلیل به کارگیری این ابزار، سهولت پیاده‌سازی زوایای مختلف ابـزار بـر روی این نوع فولاد تندبر می‌باشد. زوایای مورد نظر به کمک یک دستگاه سنگ ابزار و با دقـت ۰.۵± درجـه، بروی سطوح ابزارهای مختلف ایجاد گردید. شکل (۱) چند نمونه از ابزارهای برشی مـورد اسـتفاده در انجـام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه بـه انجـام آزمـایش‌هـای اولیـه و در نظـر گرفتن حداقل طول برشی مورد نیاز برای انـدازه‌گیـری صافی سـطح (مشخصـات و محـدودیت‌هـای دسـتگاه اندازه‌گیری صافی سطح) و همچنین جلوگیری از تـأثیر

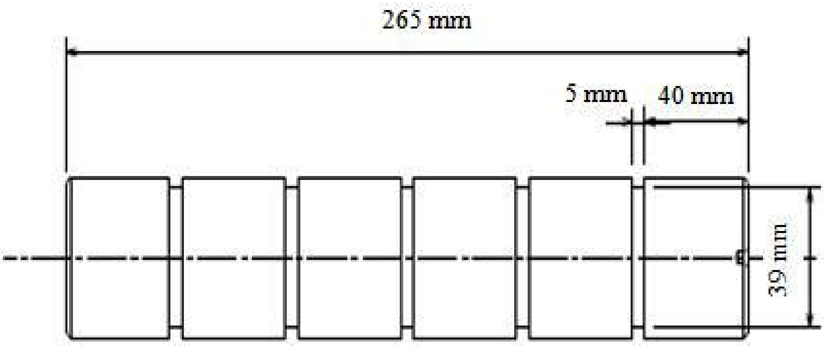
فرسایش ابزار بروی هندسه‌ی آن و کیفیت سطح حاصله، قطعه‌ی آزمایشی با ابعاد نشان داده شده در شکل (۲) طراحی و تهیه گردید.

جدول ۱ عناصر تشکیل دهنده فولاد AISI1045

ترکیب شیمیایی						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Others
0.46	Max. 0.40	0.65	Max. 0.40	Max. 0.10	Max. 0.40	(Cr+Mo+Ni) = max 0.63



شکل ۱ چند نمونه از ابزارهای آماده شده برای انجام آزمایش‌ها

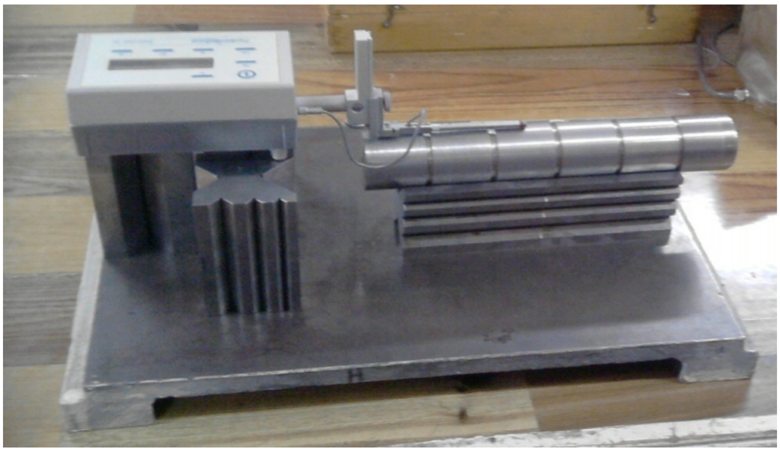


شکل ۲ نمونه قطعه مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

صافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده (Ra) با استفاده از دستگاه زبری سنج Taylor-Hobson (شکل ۳) در جهت حرکت ابزار و در سه نقطه‌ی مختلف از سطح نمونه، اندازه‌گیری گردید. در این مطالعه، میانگین صافی سطح در این سه نقطه به عنوان صافی سطح قطعه در نظر گرفته شده است.

انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

هدف از این مطالعه، بررسی میزان تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار و تعیین همزمان مقادیر بهینه‌ی این پارامترها به منظور بهبود کیفیت سطح در عملیات تراشکاری فولاد AISI1045 می‌باشد. بدین منظور، سرعت برشی (v) و نرخ پیشروی (f) به عنوان پارامترهای برشی و زاوایای براده (γ)، تنظیم اصلی (X) و تنظیم فرعی (X')، به عنوان پارامترهای هندسی ابزار، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در مقابل، صافی سطح قطعات به عنوان مهمترین مشخصه‌ی خروجی فرآیند، در نظر گرفته شده است. هر یک از پارامترهای تنظیمی در پنج سطح مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. جدول (۲) پارامترهای تنظیمی فرآیند را به همراه سطوح آنها نشان می‌دهد.



شکل ۳ دستگاه زبری سنج در حال اندازه‌گیری صافی سطح

جدول ۲ سطوح مختلف متغیرهای فرآیند

سطح	سرعت برشی (متر / دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر / دور)	زاویه براده (درجه)	زاویه تنظیم اصلی (درجه)	زاویه تنظیم فرعی (درجه)
۱	۱۸	۰/۰۵	۲	۰	٤
۲	۳٦	۰/۲	۵	۱۰	۸
۳	۵۲	۰/۳۵	۱۰	۲۰	۱۲
٤	۷۳	۰/۵	۱۵	۳۰	۱٦
۵	۱۰٤	۰/٦۵	۲۰	٤۰	۲۰

جدول ٣ ماتریس آزمایش‌ها و نتایج خروجی

شماره آزمایش	γ	X	X '	V	f	$\bar{R}a$	S/N
١	١	١	١	١	١	٨/١٣	−١٨/٢
٢	١	٢	٢	٢	٢	٩/١٢	−١٩/٢
٣	١	٣	٣	٣	٣	٢٨/٦٠	−٢٩/١
٤	١	٤	٤	٤	٤	٢٠/٦٠	−٢٦/٣
٥	١	٥	٥	٥	٥	٢/١١	−٦/٥
٦	٢	١	٢	٣	٤	٨/٣٨	−١٨/٥
٧	٢	٢	٣	٤	٥	٤/٠١	−١٢/١
٨	٢	٣	٤	٥	١	١/٥٠	−٢/٢
٩	٢	٤	٥	١	٢	٥/١٧	−١٤/٣
١٠	٢	٥	١	٢	٣	٤٠/٢٠	−٣٣/٦
١١	٣	١	٣	٥	٢	٢/١٠	−٢/٩
١٢	٣	٢	٤	١	٣	٩/٨٨	−١٩/٩
١٣	٣	٣	٥	٢	٤	٧/٥٣	−١٧/٥
١٤	٣	٤	١	٣	٥	١٥/٥٠	−٢٣/٨
١٥	٣	٥	٢	٤	١	٣/٣٧	−١٠/٦
١٦	٤	١	٤	٢	٥	٣/٢٥	−١٠/٣
١٧	٤	٢	٥	٣	١	١/٩٠	٤/٢
١٨	٤	٣	١	٤	٢	٤/١٠	−١٢/٢
١٩	٤	٤	٢	٥	٣	٤/٤٢	−١٢/٩
٢٠	٤	٥	٣	١	٤	٣٩/٤	−٣١/٩
٢١	٥	١	٥	٤	٣	١/٨٥	٦/١
٢٢	٥	٢	١	٥	٤	٣/٠٠	−٩/٦
٢٣	٥	٣	٢	١	٥	١٤/٦٠	−٢٣/٣
٢٤	٥	٤	٣	٢	١	١/٥٨	−٣/٩
٢٥	٥	٥	٤	٣	٢	٢/١٠	−٦/٤

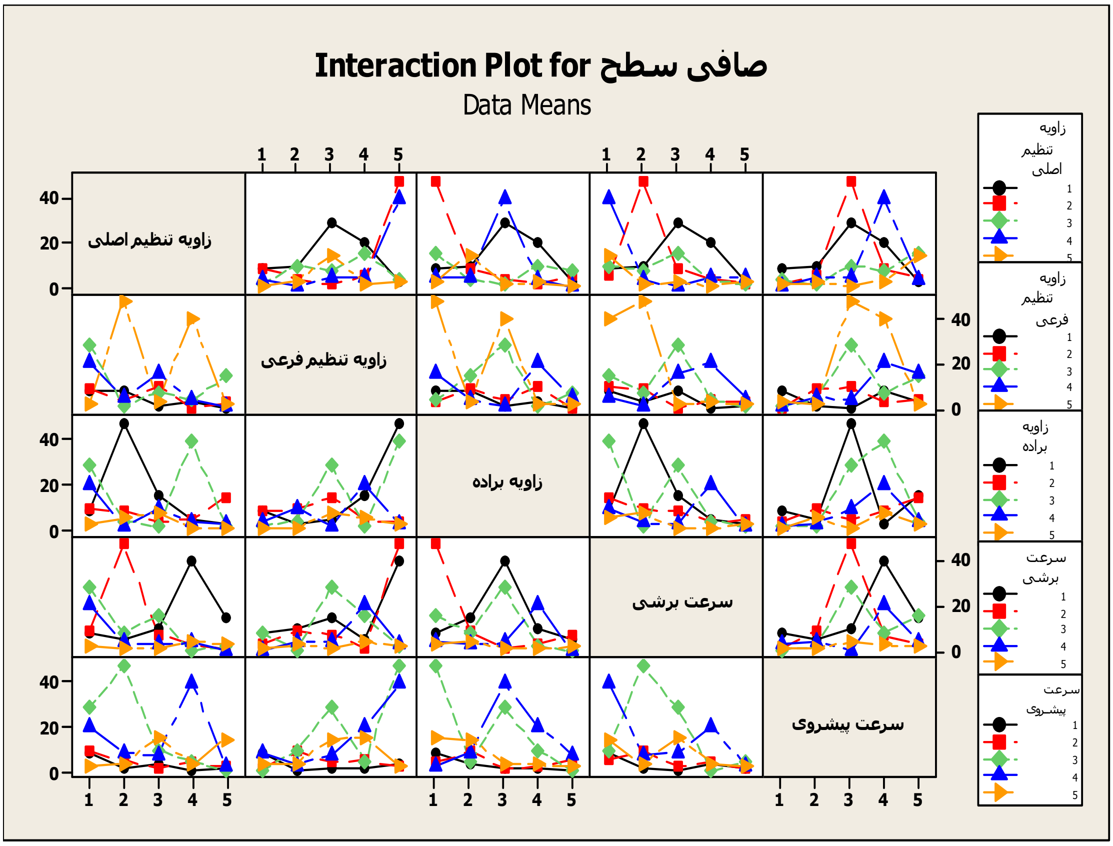
برای کسب اهداف این تحقیق، بـه مجموعـه‌ای از داده‌های تجربی فرآیند، نیاز است. بـا توجـه بـه تعـداد پارامترها و سطوح آنها، تعداد کل حالات (آزمایش‌هـا) از رابطه‌ی $n = L^K$ به دست می‌آید. در این رابطـه n تعداد آزمایش‌ها، L تعداد سطوح و K تعداد پارامترهای مورد بررسی هستند. در مسأله‌ی این تحقیق، ٥ پـارامتر هریـک در ٥ سـطح وجـود دارد، بنـابراین تعـداد کـل آزمایش‌ها برابر ٣١٢٥ آزمایش خواهد بود. واضح است که انجام این تعداد آزمایش بسیار زمانبر بوده و مقـرون به صرفه نیـز نمـی‌باشـد. در نتیجـه، بـرای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، از رویکرد طراحی آزمـایش‌هـا بـه روش تاگوچی استفاده شده است.

تاگوچی یک رویکرد کاربردی در زمینـه‌ی کنتـرل کیفیت صنایع تولیدی ارایه می‌دهد. اهداف اصلی روش

تاگوچی شامل تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر روی خروجی فرآیند و تعیین سطوح بهینه‌ی این پارامترها است. روش تاگوچی با تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی که در شرایط از پیش تعیین شده جمع‌آوری شده‌اند، به این اهداف دست می‌یابد.

در این تحقیق طراحی آزمایش‌ها در محیط نرم‌افزار Minitanb 16 انجام گرفته است. تاگوچی برای پنج فاکتور ورودی و پنج سطح، آرایه متعامد L_{25} را پیشنهاد می‌کند. بنابراین ۲۵ آزمایش، طبق سطوح ارایه شده در جدول (۳)، انجام و زبری سطح قطعات اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است، به‌منظور افزایش دقت آزمایش‌ها، ترتیب انجام آزمایش‌ها به صورت اتفاقی (نه لزوماً به ترتیب ارایه شده در جدول (۳)) بوده است. زبری سطح بر حسب میکرومتر، در سه نقطه از هر نمونه در جهت ماشین‌کاری، اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به‌عنوان خروجی هر آزمایش در ستون هفتم جدول (۳) گزارش شده است.

بررسی اثر متقابل پارامترهای تنظیمی بر صافی سطح. تأثیر متقابل پارامترهای ورودی در شکل (٤) نشان داده شده است. این شکل شامل پنج ردیف است که در هر ردیف اثر متقابل هر یک از پارامترها با چهار پارامتر دیگر گنجانده شده است. به عنوان مثال، در ردیف اول اثر متقابل زاویه‌ی تنظیم اصلی با زاویه‌ی تنظیم فرعی، زاویه‌ی براده، سرعت برشی و سرعت پیشروی نشان داده شده است. محور عمودی بیانگر میزان صافی سطح بر حسب میکرومتر و محور افقی سطوح تنظیمی هر یک از پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل ٤ بررسی اثر متقابل پارامترهای تنظیمی بر صافی سطح

با توجه به شکل (٤)، مشخص است که در بررسی اثر متقابل زاویه‌ی تنظیم اصلی و فرعی به‌ازای زاویه‌ی تنظیم اصلی در سطح پنجم و زاویه‌ی تنظیم فرعی در سطح اول صافی سطح مینیمم به دست می‌آید.

تحلیل نسبت سیگنال به نویز (Signal to Noise Ratio). در روش تاگوچی، فاکتورها یا متغیرهای فرآیند به دو گروه فاکتورهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم می‌شوند. عوامل کنترلی (Signal Factor) آن دسته از عواملی هستند که کنترل آنها به راحتی امکان‌پذیر بوده و به منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی فرآیندهای ساخت به کار می‌روند. به عنوان مثال، سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش در فرآیندهای ماشین‌کاری به عنوان عوامل کنترلی در نظر گرفته می‌شوند. متغیرهای غیر کنترلی (Noise Factor) تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند، اما بدین دلیل که کنترل آنها مشکل است یا شناخت کافی از آنها وجود ندارد، بر حسب مورد، ثابت در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، در یک فرآیند ماشین‌کاری ارتعاشات دستگاه، دما، رطوبت و سایر شرایط محیطی عوامل غیر کنترلی محسوب می‌شوند.

نسبت سیگنال به نویز، نشان‌دهنده‌ی حساسیت مشخصه‌ی مورد بررسی به فاکتورهای ورودی در یک فرآیند کنترل شده می‌باشد [15]. شرایط بهینه با تعیین تأثیر هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی مشخصه‌ی خروجی، شناسایی می‌شود. از نقطه نظر مشخصه‌ی خروجی فرآیند، آن را می‌توان به سه دسته‌ی هر چه کمتر، بهتر (Smaller the better)، هر چه به مقدار اسمی نزدیک‌تر، بهتر (Nominal the best) و هر چه بزرگتر بهتر (Larger the better) تقسیم‌بندی نمود. به عنوان مثال، برای یک قطعه‌ی ماشین‌کاری شده میزان ناصافی سطوح در گروه اول، ابعاد و تلرانس‌ها در گروه دوم و عمر مفید آن در دسته سوم قرار می‌گیرند.

تاگوچی برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز، بر حسب اینکه مشخصه‌ی مورد نظر جزء کدام یک از سه گروه فوق باشد، روابط مختلفی را ارایه کرده است. اما به طور کلی، در هر آزمایش همواره بالاترین نسبت (S/N) مطلوب است. مقادیر بالای (S/N) نشان دهنده‌ی این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و اغتشاشی می‌باشد. خروجی اندازه‌گیری شده در این تحقیق، زبری سطح است که در گروه هر چه کمتر، بهتر قرار می‌گیرد. بنابراین از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود.

$$S/N = -10\ \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i)^2\right) \qquad (١)$$

در رابطه‌ی فوق n تعداد تکرار هر آزمایش و y_i مقدار iامین خروجی اندازه‌گیری شده است. نسبت سیگنال به نویز برای هر یک از ۲۵ آزمایش انجام شده با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردیده و در ستون آخر جدول (۳) نشان داده شده است. به عنوان مثال، برای محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش اول با توجه به این که هر یک از آزمایش‌ها یک مرتبه انجام شده و n برابر با یک است، داریم:

$$\frac{S}{N} = -10\ \log_{10}(8.13)^2 = -18.2$$

تحلیل واریانس (Analysis of Variance). چون در آزمایش‌های عاملی کسری، تنها بخشی از مجموعه‌ی حالات ممکن مورد آزمایش قرار می‌گیرند، به منظور حصول اطمینان از دقت نتایج نهایی، می‌بایست از روش‌های آماری مناسب استفاده نمود. تحلیل واریانس، یک روش آماری استاندارد است که در

محاسبه‌ی درجه‌ی اطمینان و تعیین درصد مشارکت هر یک از متغیرها بر روی خروجی فرآیند، کاربرد دارد [15]. در ادامه، تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی نتایج آزمایش‌های تراشکاری فولاد AISI1045 ارایه می‌شود.

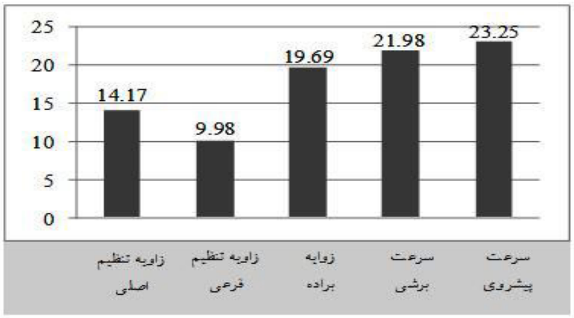
جدول (٤)، تحلیل واریانس برای صافی سطح در تراشکاری فولاد AISI1045 را نشان می‌دهد. این تحلیل بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪ (عدم قطعیت ۵٪) انجام شده است. ستون دوم جدول، درجه‌ی آزادی (DF) هر یک از پارامترها، ستون سوم مجموع مربعات (SeqSS)، ستون چهارم مجموع مربعات تعدیل یافته (Adj SS)، ستون پنجم میانگین مجموع مربعات (AdjMS)، ستون ششم آماره‌ی F، ستون هفتم آماره‌ی P و ستون هشتم میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی مورد نظر (P%) را نشان می‌دهند. آماره‌ی P به منظور تعیین معنادار بودن تأثیر هر یک از پارامترها بر روی خروجی استفاده می‌شود. با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ که تحلیل بر اساس آن انجام شده، اگر مقدار P برای هر یک از پارامترها کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان دهنده‌ی معنادار بودن تأثیر پارامتر بر خروجی است. همان‌گونه که در جدول مشخص است مقدار P برای همه‌ی پارامترها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد.

آماره‌ی F یا تست فراوانی (Frequency Test) نیز مانند آماره‌ی P برای تعیین معنادار بودن تأثیرات پارامترها بر روی خروجی به‌کار می‌رود [9]. از جدول (٤) مشخص است که مقدار آماره‌ی F برای هر یک از ورودی‌ها از مقدار F بحرانی ($F_{0.05,4,4} = 6.38$) که از جدول‌های آماری استاندارد به دست می‌آید، بیشتر است. در نتیجه، تمامی پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق دارای معنای آماری و فیزیکی بر روی خروجی فرآیند (صافی سطح) هستند. ستون آخر جدول (P%) نیز که سهم هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی را بر حسب درصد نشان می‌دهد در شکل (۵) به صورت نمودار میله‌ای ترسیم شده‌اند.

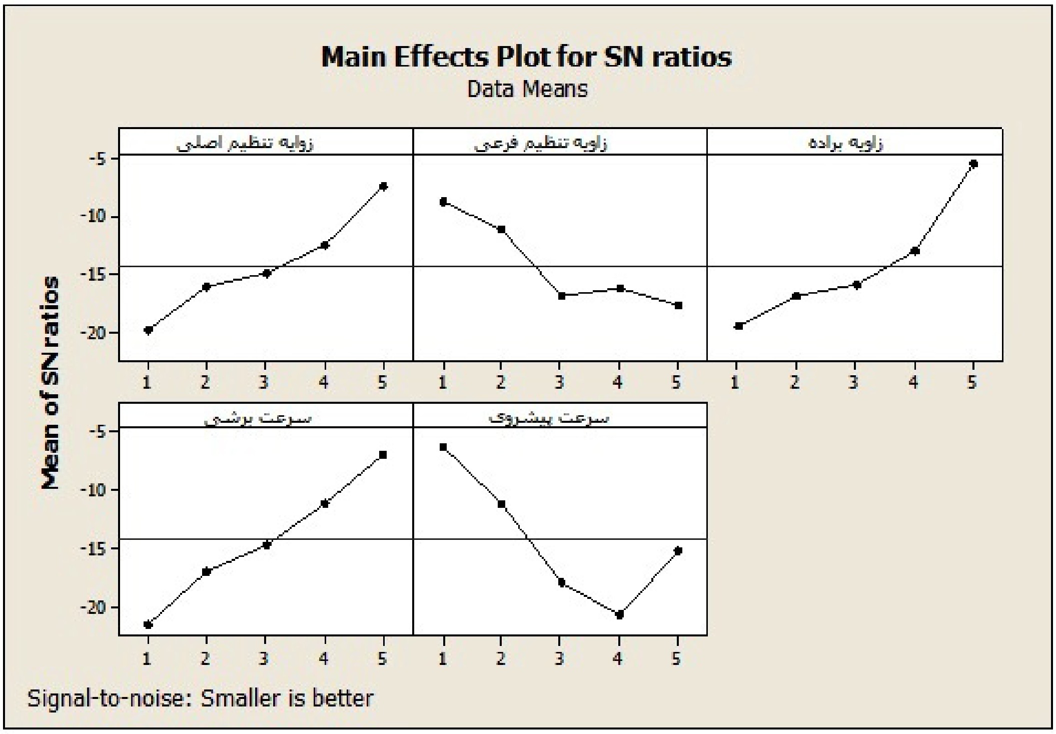
همان‌گونه که ذکر شد، شکل (۵) میزان تأثیر هر یک از پارامترهای متغیر بر خروجی را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که سرعت پیشروی (با بیش از ۲۳٪) بیشترین تأثیر را بر روی صافی سطح دارد. سایر پارامترها به ترتیب اهمیت، سرعت برشی، زاویه‌ی براده، زاویه‌ی تنظیم اصلی و زاویه‌ی تنظیم فرعی می‌باشند. با توجه به نمودار شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای ماشین‌کاری نسبت به هندسه‌ی ابزار، تأثیر بیشتری بر روی صافی سطح دارند.

جدول ٤ نتایج تحلیل واریانس نسبت سیگنال به نویز

	DF	SeqSS	Adj SS	AdjMS	F Test	P value	P(%)
X	٤	٤٢٢/٧	٤٢٢/٧	١٠٥/٦٩	٨/٨٠	٠/٠٢٩	١٤/١٧
X'	٤	٣١٢/١	٣١٢/١	٧٨/٠٢	٦/٥٠	٠/٠٤٩	٩/٩٨
γ	٤	٥٦٨/٧	٥٦٨/٧	١٤٢/١٨	١١/٨٤	٠/٠١٧	١٩/٦٩
V	٤	٦٢٩/٤	٦٢٩/٤	١٥٧/٣٥	١٣/١٠	٠/٠١٤	٢١/٩٨
f	٤	٦٦٢/٨	٦٦٢/٨	١٦٥/٧٠	١٣/٨٠	٠/٠١٣	٢٣/٢٥
Error	٤	٤٨/٠٥	٤٨/٠٥	١٢/٠١			١٠/٩١
Total	٢٤	٢٦٤٣					١٠٠



شکل ۵ درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر صافی سطح



شکل ٦ میانگین نسبت سیگنال به نویز

در تحقیق حاضر، طبق رابطه‌ی (۱) مقادیر سیگنال به نویز (S/N) برای نتایج تمامی آزمایش‌ها محاسبه شد. سپس برای هر یک از سطوح مورد آزمایش هر پارامتر، میانگین مقدار سیگنال به نویز به دست آمد. شکل (٦) میانگین نسبت سیگنال به نویز برای هر یک از پنج پارامتر تنظیمی را در فرآیند تراشکاری نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ذکر شد، همواره مقادیر بالای نسبت سیگنال به نویز، مطلوب می‌باشد. بنابراین بر اساس میانگین نسبت سیگنال به نویز هر پارامتر تنظیمی، می‌توان سطوح بهینه‌ی آنها را تعیین نمود. با توجه به شکل (٦)، بهترین سطوح پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار برای دستیابی به بهترین صافی سطح (کمترین زبری سطح) با در نظر گرفتن علامت منفی، x5 x'1 γ5 v5 f1 هستند. به این ترتیب برای کسب زبری سطح مطلوب، باید سرعت پیشروی برابر ۰.۰۵

میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۱۰٤ متر بر دقیقه، زاویه‌ی براده ۲۰ درجه، زاویه‌ی تنظیم فرعی ٤ درجه و زاویه‌ی تنظیم اصلی بر روی ٤۰ درجه تنظیم شوند. لازم به ذکر است، در کاربردهای عملی مقادیر فوق را می‌توان به نزدیک‌ترین مقدار قابل تنظیم گِرد نمود.

به منظور تأیید نتایج بهینه‌سازی، یک آزمایش (با تنظیم مقادیر بهینه‌ی به دست آمده) انجام و سه مرتبه تکرار گردید. میانگین صافی سطح در این سه آزمایش برابر با ۱/۳میکرون متر به دست آمد که نسبت به بهترین حالت در بین آزمایش‌های انجام شده حدود ۱٤ درصد بهبود کیفیت سطح را در پی داشته است. این مسأله، نشان‌گر قابل اعتماد بودن نتایج و روش پیشنهادی در این مطالعه برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تنظیمی در فرآیند تراشکاری فولادهای AISI 1045 می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، کیفیت قطعات ماشین‌کاری شده با معیار صافی سطح آنها سنجیده می‌شود. کیفیت سطح قطعات به‌نوبه‌ی خود وابسته به پارامترهای برشی و هندسه‌ی ابزار مورد استفاده می‌باشد. بنابراین، برای دستیابی به کیفیت سطح مطلوب، پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار باید به صورت همزمان برروی مقادیر مناسب، تنظیم شوند. در این مطالعه، اثرات همزمان پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار بر روی صافی سطح قطعات تراشکاری شده از جنس فولاد AISI 1045 بررسی شده است. در این خصوص، از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها و تعیین سطوح بهینه‌ی پارامترها و از تحلیل واریانس برای اثبات معنادار بودن تأثیر پارامترها بر روی خروجی استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که تمامی پنج پارامتر تنظیمی، که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، دارای تأثیرات معنادار بر صافی سطح قطعات می‌باشند. هم‌چنین به کمک تحلیل نسبت سیگنال به نویز که بر روی نتایج آزمایش‌های عملی انجام پذیرفت، سطوح بهینه‌ی پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه‌ی ابزار برای ماده‌ی مورد بررسی، تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که برای کسب بهترین صافی سطح، سه پارامتر سرعت برشی، زاویه‌ی براده و زاویه‌ی تنظیم اصلی باید در بالاترین سطح و نرخ پیشروی و زاویه‌ی تنظیم فرعی در پایین‌ترین سطح خود قرارگیرند. در همین راستا، با استفاده از تحلیل واریانس(ANOVA)، میزان تأثیر هر یک از این پارامترها در خروجی فرآیند ماشین‌کاری مورد ارزیابی قرارگرفت. براساس نتایج تحلیل واریانس، پارامترهای هندسی ابزار، نسبت به پارامترهای ماشین‌کاری، تأثیر کمتری بر روی صافی سطح دارند. از میان پارامترهای ماشین‌کاری، سرعت پیشروی نسبت به سرعت برشی تأثیر بیشتری بر روی کیفیت سطح قطعات را دارا می‌باشد. رویکرد ارایه شده در این تحقیق را می‌توان، با اعمال تغییرات جزیی، برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی سایر فرآیندهای ماشین‌کاری نیز مورد استفاده قرار داد.

مراجع

1. Mukherjee, I. and Ray, K.R., "A Review of Optimization Techniques in Metal Cutting Processes", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 50, pp. 15-34, (2006).
2. Gokkaya, H. and Nalbant, M., "The Effects of Cutting Tool Geometry and Processing Parameters on the Surface Roughness of AISI 1030 Steel", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 717-721, (2007).

3. Yang, W.H. and Tarng, YS., "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, pp. 122-129, (1998).
4. Kopac, J., Bahor, M. and Sokovic, M., "Optimal Machining Parameters for Achieving the Desired Surface Roughness in Fne Turning of Cold Pre-formed Steel Workpieces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 707-716, (2002).
5. Chien, W.T. and Tsai, C.S., "The Investigation on the Prediction of Tool Wear and the Determination of Optimum Cutting Conditions in Machining 17-4PH Stainless Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 340–345, (2003).
6. Nalbant, M., Gokkaya, H. and Sur, G., "Application ofTaguchi Method in the Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1379–1385, (2007).
7. Aslan, E., Camuscu, N. and Birgoren, B., "Design Optimization of Cutting Parameters When Turning Hardened AISI 4140 Steel(63 HRC) with Al2O3 + TiCN Mixed Ceramic Tool", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1618–1622, (2007).
8. Manna, A. and Salodkar, S., "Optimization of Machining Conditions for Effective Turning of E0300 Alloy Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, pp. 143-157, (2008).
9. Muthukrishnana, N. and Davim, P.D., "Optimization of Machining Parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN Analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 225-232, (2009).
10. Kini, M.V. and Chincholkar, A.M., "Effect of Machining Parameters on Surface Roughness and Material Removal Rate in Fnish Turning of ±30Glass Fibre Reinforced Polymer Pipes", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3590–3598, (2010).

۱۱. رازفر، محمدرضا، اصول ماشین‌کاری و ابزار شناسی، تهران: دانشگاه صنعتی امیر کبیر، (۱۳۸٤).

12. Coelho, R.T., Silva, L.R., Braghini, A. and Bezerra, A.A., "Some Effects of Cutting Edge Preparation and Geometric Modifications When Turning INCONEL 718 at High Cutting Speeds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, pp. 147-153, (2004).
13. Fang, N. and Wu, Q., "The Effects of Chamfered and Honed Tool Edge Geometry in Machining of Three Aluminum Alloys", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 1178–1187, (2005).
14. Kountanya, R., Al-Zkeri, I. and Altan, T., "Effect of Tool Edge Geometry and Cutting Conditions on Experimental and Simulated Chip Morphology in Orthogonal Hard Turning of 100Cr6 Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5068–5076, (2009).
15. Roy, R.K., "*A primer on the Taguchi method*", New York: Van Nostrand Reinhold, (1990).